Caldasia 26(1) 2004: 173-184

CARACTERÍZACIÓN DEL SEDIMENTO DE UNA LAGUNA TROPICAL RASA

Characterization of the sediment in a tropical shallow lake

J. J. RAMÍREZ R.
J. F. NOREÑA
Departamento de Biología,Universidad de Antioquia, Apartado 1226, Medellín, Colombia. jjram@matematicas.udea.edu.co

RESUMEN

Se presentan las características mecánicas y los contenidos de materia orgánica, humedad, fósforo y calcio del sedimento de la laguna del Parque Norte, un sistema eutrófico tropical raso. El sedimento se ajusta al tipo orgánico (contenido medio de materia orgánica: 16.5%), se caracteriza desde el punto de vista mecánico como franco arenoso, con alto contenido de agua (media = 84.4%). Como consecuencia de las altas temperaturas del agua, los valores de materia orgánica y fósforo hallados fueron mucho menores al ser comparados con los encontrados en ecosistemas lacustres de la zona templada. A pesar de su condición de ecosistema raso (profundidad media: 1.60 m) y su naturaleza cinética, el 'metabolismo de corto circuito' afecta la velocidad de la descomposición y con esto los contenidos de materia orgánica y nutrientes en el sedimento. La dinámica del sedimento es lenta y, por ello, su resuspensión es baja, a pesar del carácter polimíctico del cuerpo de agua.

Palabras clave. Limnología, eutroficación, sedimentos, laguna tropical.

ABSTRACT

The mechanical characteristics and the contents of organic matter, humidity, phosphorus and calcium of the sediments of the Parque Norte lake, a tropical and eutrophic shallow system, are presented. The sediment is adjusted to the organic type (half content of organic matter: 16.5%) characterized from the mechanical point of view as sandy franc and with high content of water (mean value: 84.4%). As a consequence of the high water temperatures, the values of organic matter and phosphorus found are much smaller when compared with the opposing ones in lacustrine ecosystems of temperate zone. In spite of its condition of shallow ecosystem (mean depth: 1.60 m) and its kinetic nature, 'short circuit metabolism' influences the speed of decomposition and the contents of organic matter and nutrients in the sediment. Sediment dynamics is slow, consequently, the resuspension's effect is slow too, in spite of the polimictic condition of the water body.

Key words. Limnology, eutrophication, sediments, tropical shallow lake.

INTRODUCCIÓN

Los depósitos de sedimentos en los lagos funcionan bien sea como fuente o como reserva de muchos de los nutrientes esenciales involucrados en el proceso de eutroficación. El intercambio de nutrientes entre los sedimentos y el agua sobreyacente depende de las características químicas del agua y de las del sedimento (Wetzel 1981). Este compartimiento ecosistémico actúa como una reserva tampón de nutrientes para la columna de agua, pues por un lado amortigua los aumentos de nutrientes en el medio provenientes de los aportes directos y/o de la descomposición de materia orgánica, reteniendo una parte de los mismos. De otro lado, compensan los déficits de nutrientes en periodos de alta demanda biológica, liberando parte de estas formas retenidas (Carmouze 1994). Además, la energía externa disponible en el ambiente o en el sistema se refleja en las características del sedimento; por ello, la composición de los materiales de origen alóctono o autóctono y la velocidad con que se acumulan expresa la actividad del lago como receptor de una cuenca y como centro de actividad biológica (Margalef 1983).

El sedimento ha sido muy poco utilizado en la caracterización de ecosistemas lacustres y fue Naumann (1930) quien lo utilizó para la tipología de lagos por primera vez. Según este autor, sedimentos ricos en compuestos de fósforo, nitrógeno y materia orgánica de origen autóctono son típicos de lagos eutróficos, mientras que sedimentos con baja concentración de compuestos fosfatados, nitrogenados y de materia orgánica caracterizan lagos oligotróficos.

Estudios llevados a cabo por Esteves & Camargo (1982) y Esteves (1983) en el sedimento de 13 represas del Estado de São Paulo mostraron que estos cuerpos de agua se caracterizan por poseer sedimentos de baja concentración de materia orgánica y de compuestos de fósforo y nitrógeno. Se concluyó que estos parámetros, hasta entonces utilizados en la tipología de lagos especialmente en regiones templadas, no eran adecuados para clasificar los cuerpos de agua estudiados en esta región brasilera.

La composición granulométrica del sedimento en un sistema lacustre es un factor de importancia en la determinación de los patrones de distribución de organismos y estructura de comunidades de macroinvertebrados bentónicos. Muchas veces los porcentajes de las fracciones de arena, limo y arcilla constituyen variables explicativas más eficientes que las físicas y químicas tradicionalmente usadas por los limnólogos interesados en la distribución de macroinvertebrados bentónicos (Callisto & Esteves 1996).

La mayoría de las investigaciones sobre sedimentos se han llevado a cabo en lagos templados, principalmente en Europa. Los estudios en la región tropical incluyen, entre otros, los de Hummel (1931) en lagos de Indonesia y los de Viner (1975a, 1975b, 1975c, 1975d) en lagos africanos. Para suramérica son conocidas las investigaciones de Esteves & Camargo (1982), Esteves *et al.* (1983), Esteves & Tolentino (1986) y Petrucio *et al.* (1997), entre otros. En Colombia, los pocos esfuerzos sobre el tema se han dedicado al establecimiento de las concentraciones de metales pesados en el material suspendido (Campos, 1992) o en el sedimento (M. Mera inéd.). En la laguna en cuestión, Noreña & Ramírez (2001) determinaron el comportamiento del seston en dos periodos climáticos contrastantes.

¿Cuál es la composición del sedimento de la laguna del Parque Norte? ¿Cómo son los valores de materia orgánica en comparación con los de otros lagos? Basados en la premisa de que los lagos pertenecientes a la planicie de inundación

de un río tienen sedimento arenoso y alto contenido de material orgánico, pero que sin embargo, algunos de ellos con esta génesis no se ajustan a estas características, se prevé que el sedimento de la laguna, a pesar de ser un lago de origen fluvial, no tiene sedimento arenoso ni alto contenido absoluto de material orgánico. Ya para la segunda pregunta, la hipótesis correspondiente hace referencia a que si en los lagos tropicales la mayor temperatura potencia una mayor acción catabólica, se prevé entonces que las concentraciones de material orgánico son menores en cuerpos de agua de este tipo (tropicales y rasos) que en otros localizados en latitudes diferentes. Las metas propuestas para lograr corroborar las hipótesis planteadas son 1) examinar la composición del sedimento en lo referente a granulometría, humedad, materia orgánica y contenidos de calcio y fósforo; y 2) comparar las concentraciones de materia orgánica y fósforo total obtenidas en el sedimento con las de otros sistemas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

La laguna del Parque Norte es un cuerpo de agua endorreico y de origen natural en la planicie de inundación del río Medellín. Se sitúa en el municipio de Medellín, departamento de Antioquia, Colombia, a los 6° 04' N y 75° 33.4' W. Se localiza en la Región Andina a 1480 msnm en una zona de vida correspondiente a un bosque húmedo Premontano Tropical (bh-PM-T) (Holdridge 1978). El clima de la zona es de tipo tropical con periodo lluvioso máximo en los meses de mayo y octubre (Espinal 1992).

Las características morfométricas principales del cuerpo de agua son las siguientes: área superficial: 41424.97 m^2, volumen: 66198.51 m^3, profundidad media: 1.60 m, profundidad máxima: 2.10 m, profundidad relativa: 0.76 m, porcentaje de la pendiente media: 1.86%, e índice de desarrollo de volumen: 2.29.

Muestreo

Utilizando una draga *Eckman* se extrajeron de una estación de muestreo localizada en el punto más profundo del cuerpo de agua tres muestras entre los meses de abril y mayo del 2000. De cada muestra se tomaron tres repeticiones, para un total de nueve datos por tratamiento. Una vez extraídas las muestras fueron colocadas en frascos plásticos herméticamente cerrados y analizadas, en lo posible, el mismo día. Los análisis granulométricos fueron realizados en el laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional (sede Medellín).

El contenido de materia orgánica en el sedimento (n = 14) se estableció como porcentaje de material orgánico en el peso seco del mismo. Para ello se pesó una cantidad inicial de sedimento (P_1), la cual fue secada en una mufla a temperaturas entre 103-105ºC, enfriados en desecador por una hora, y pesados nuevamente (P_2). Luego se calcinaron en la mufla a 503ºC, se enfriaron y pesaron (P_3). El porcentaje de materia orgánica (%M.O PS) en P_1 se obtuvo mediante la fórmula:

$$\%M.O\ PS = 100\ (P_2 - P_3)/\ P_2$$

El porcentaje de humedad (n = 11) como porcentaje del peso del sedimento húmedo ($\%H_2O$) se determinó de forma similar, mediante la fórmula:

$$(\%H_2O) = 100\ (P_1 - P_2)\ /\ [P_1 - (P_2 - P_3)]$$

Las profundidades crítica ($D_{T\text{-}A}$) y de acumulación (D_A), y las áreas de transporte y erosión (a_{T+E}) y de acumulación (a_A) se calcularon con base en la curva hipsográfica de la laguna siguiendo las recomendaciones de Håkanson & Jansson (2002). Siguiendo también a estos autores se obtuvo el valor del coeficiente de resuspensión. La curva

hipsográfica fue construida y analizada acorde con lo propuesto en Håkanson (1981).

RESULTADOS

El análisis mecánico del sedimento, consistente en la determinación de la proporción de partículas sólidas de cada intervalo de tamaño, mostró una textura del tipo franco arenosa en la que la arena representó un 72% del total, el limo un 18% y la arcilla un 10%.

El porcentaje de materia orgánica en el sedimento seco presentó un valor medio de 16.5%, un valor mínimo de 8.3% y un máximo de 20.1%. El coeficiente de variación encontrado para las 14 muestras fue relativamente bajo (22.4%), al igual que el valor del intervalo de confianza del 95% (límite inferior:14.3%, límite superior: 18.6%)

En la Tabla I se compara el valor medio del porcentaje de materia orgánica hallado en el sedimento del cuerpo de agua estudiado con el de otros sistemas ecológicos localizados en diferentes regiones de Brasil. A primera vista se observa que el porcentaje de materia orgánica hallado en la laguna del Parque Norte es uno de los más altos.

La curva hipsográfica de la laguna presenta forma concava (tipo C), con dos puntos de inflexión (código Cmi) y un perfil en forma de U abierta (Fig. 1A). Esta curva muestra además un cuerpo de agua con pendientes

Tabla I. Valores de materia orgánica (como porcentaje del peso seco) y contenido de fósforo (mg/l) en el sedimento de algunos cuerpos de agua tropicales y en esta investigación.

Sistema	Materia orgánica	Fósforo total
Bariri*	9.5	380.7
Barra Bonita*	4.3	513.6
Ibitinga*	7.3	327.5
Promissão*	3.7	14.4
Graminha*	11.1	218.8
Jaguará*	12.0	192.7
Volta Grande*	10.3	167.8
Jurumirim*	6.9	70.8
Pirajú *	12.8	340.3
Rio Novo*	9.0	117.3
Rio Pari*	13.2	260.5
Salto Grande*	10.6	197.5
Jupiá*	16.9	263.2
Lago Poço Verde***	24.5 (fracción 0 – 5 cm)	-----
17 lagunas de Espirito Santo***	12.9	-----
13 lagunas de Rio de Janeiro ****	21.7	-----
Laguna del Parque Norte**	16.5	14.0
Media	11.9	219.9
Coeficiente de variación (%)	46.5	64.7
Intervalo de confianza (95%)	2.6	74.5
Número de datos	17	14

* Esteves & Camargo (1982); ** Esta investigación; *** Esteves *et al.* (1982, valor medio); **** Esteves (1988, valor medio).

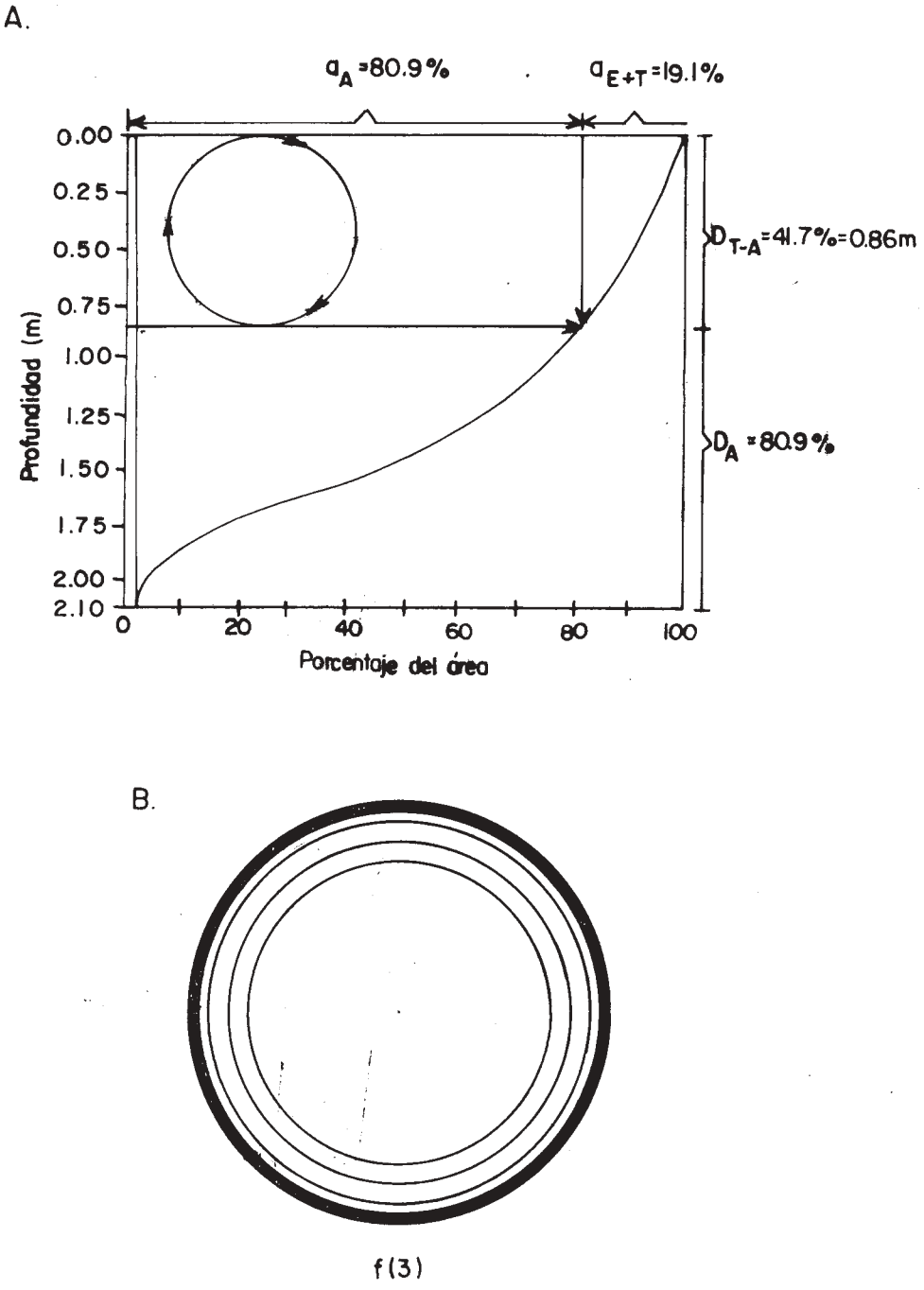

Figura 1. Laguna del Parque Norte, Medellín, Colombia. (A) Curva hipsográfica mostrando las áreas de acumulación, erosión y transporte; y las profundidades crítica y de acumulación. (B) Interpretación batimétrica esquemática de la forma de la laguna.

relativamente fuertes en las orillas, declives suaves hacia el centro y fondo plano (Fig. 1B) (Ramírez 2000). La desviación estándar de 3 presentada por las curvas de este tipo (Fig. 1B), corresponde a un alejamiento relativamente grande de la forma media convencional de un lago, es decir, una curva hipsográfica ligeramente convexa del tipo SCx. La profundidad crítica presentó un valor correspondiente al 41.7% de la profundidad máxima, equivalente a 0.86 m. La profundidad relativa fue de 3.1. El área de acumulación y transporte fue de 19.1%; consecuentemente, el área de acumulación fue de 80.9% y el coeficiente de resuspensión de 0.2.

DISCUSIÓN

Debido a que la denominación de laguna al cuerpo de agua estudiado ha suscitado discusiones, se hacen algunas precisiones a este respecto. En primera instancia, los tipos a los que pertenecen los sistemas lénticos rasos, no son fáciles de definir, dado que en todos los países, y Colombia no es una excepción, existen muchos nombres regionales, que se basan en diferencias de profundidad, tamaño y grado de permanencia (lagos, lagunas, ciénagas, charcas, marismas, pantanos, estanques, madreviejas, etc). Establecer mediante una definición la frontera entre una y otra categoría es difícil.

Para lago existen múltiples definiciones: «cuerpo de agua quieta que ocupa un vaso y carece de continuidad con el mar» (Forel 1892); «todas las formas de aguas interiores (lagos, lagunas, charcas, pantanos y sus intergradaciones varias) en las que el movimiento de agua no presenta un flujo continuo en una dirección definida» (Welch 1948); « cuerpo de agua amplio rodeado por tierra», entre otras. Otras definiciones enfatizan en que la mayoría de los lagos son permanentes y muchas charcas y lagunas son temporales. Todas estas definiciones fallan por uno u otro motivo que no es del caso analizar ahora. Con el fin de corregir estas fallas, la mayoría de los limnólogos modernos utilizan también como descriptores básicos para una tipología a la profundidad y a la presencia de macrófitas. Según, esto, una charca y un pantano típicos, por ser rasos, permitrán el establecimiento de vegetación enraizada; en un lago clásico el fondo estará libre de dicho tipo de vegetación, por ser demasiado profundo. Se considera además que las lagunas son pequeñas (tamaño < 1 hectárea) y los lagos grandes. Sin embargo, la profundidad mínima para que un cuerpo léntico sea considerado un lago es también motivo de discusión: 15 m en España (Alonso 1998) y 10 m en Italia (Barbanti 1985). Para la región meridional brasilera, Schwarzbold & Schäfer (1984) y Schäfer (1992) propusieron que un cuerpo de agua es raso si su profundidad máxima es menor de 3 m, medianamente profundo si oscila entre 3 y 7 m y profundo cuando la profundidad máxima varía entre 7.5 y 11 m.

Wetzel (2001) define un lago raso como aquel cuerpo de agua permanentemente estancado que es suficientemente raso para permitir la penetración de la luz hasta el fondo, lo que potencialmente soportaría adecuadamente la fotosíntesis de macrófitas en todo el lago. Aunque generalmente, el término laguna se aplica a cuerpos de agua marina directamente conectados al mar (Schäfer 1985, Timms 1992), a menudo se utiliza también para referirse a cuerpos de agua interiores, rasos y efímeros que pueden registrarse como lagos. A veces se usa para diferenciarlos el término laguna costera (por ejemplo en Río de Janeiro y Australia).

En general, puede decirse que los lagos son normalmente de agua dulce, presentan vaso bien definido con zona litoral y bental bien diferenciadas, sedimento propio, compartamentalización vertical con gradientes

de luz, densidad y temperatura, sujetos a variación estacional que repercuten en los procesos biológicos y en la calidad del agua. En la medida en que estas propiedades se van desdibujando, la imagen del lago da paso a la de laguna.

Como puede notarse, el cuerpo de agua estudiado comparte características tanto de laguna como de lago; sin embargo, consideramos que se ajusta más a los requerimientos de una laguna. Esta laguna, hoy aislada, perteneció alguna vez a la antigua planicie de inundación del río Medellín, hoy canalizado. Los porcentajes altos de arena en su composición granulométrica, refuerzan esta conclusión.

Análisis mecánico del sedimento

En un sistema léntico la materia particulada se deposita horizontalmente de manera diferencial en forma tal que las partículas de mayor tamaño, con tasas de sedimentación rápidas se depositan suavemente en los sedimentos a lo largo y ancho de la cubeta del sistema. Las partículas de tamaño menor, con velocidades de sedimentación más bajas, son llevadas en suspensión en las aguas turbulentas del epilimnion y transportadas por el lago según la dirección de las corrientes inducidas por el viento, y depositadas preferentemente en las orillas litorales (Wetzel 1981). La influencia de este tipo de transporte cobra especial importancia en el lago del Parque Norte, un sistema acuático del tipo cinético (Ramírez & Díaz 1995) en donde la dirección de los vientos dominantes es casi todo el año hacia el Sur, desplazando las partículas pequeñas en ese sentido. Quizá por ello en la estación de muestreo la fracción dominante fue la arena (72% del total), pues estas partículas mayores no son muy afectadas por la resuspensión y por tanto, no son transportadas hacia las orillas del lago por la turbulencia generada por el viento. Sin embargo, cabe agregar que en sus orígenes el lago del Parque Norte perteneció a la planicie aluvial del río Medellín, por lo que es de esperar un mayor porcentaje de arena que de las demás fracciones.

Contenido de materia orgánica

La clasificación propuesta por Ungemach (1960) considerando los sedimentos de 39 lagos europeos y un lago africano (el Victoria) divide los sedimentos lacustres en dos categorías: aquellos con porcentaje de materia orgánica mayor del 10%, clasificados como sedimentos orgánicos del tipo *gyttja*; y los que presentan porcentajes menores del 10%; designados como sedimentos minerales. Claramente, por su valor medio de materia orgánica (16.5%) el sedimento de la laguna del Parque Norte se ajusta al primer tipo.

El sedimento tipo *gyttjia*, llamado también copropélico por su origen, es un sedimento formado por la mezcla de partículas de materia orgánica, precipitaciones inorgánicas y material mineralizado. En estado fresco, este tipo de sedimento es pastoso e hidratado, de un color entre gris verdoso oscuro a negro, pero nunca marrón. En estado seco algunos *gyttjias* son duros y negros, mientras que otros son de color más claro, dependiendo del material que los forma (Wetzel 1981). La coprogénesis de este tipo de sedimentos se refiere a su origen vía material fecal, lo cual constituye un mayor aspecto de su formación. Presenta además un pH cercano al neutro y altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, este último unido a hierrro, aluminio, y en menor grado al calcio (Cole 1983).

La apariencia física del sedimento colectado en la laguna del Parque Norte era bastante hidratada (% medio de agua de 84.4%, oscilando entre 74.8% y 89.9% y con un coeficiente de variación de 6.8%), de color negro oscuro en estado fresco, gris claro una

vez seco y rojizo después de estar sometido a ignición, con un valor de pH de 6.8 y una concentración de fósforo de 14 mg/l.

Los sedimentos en general contienen entre el 20 y el 80% de su volumen en agua, la cual ocupa las cavidades que quedan entre los materiales sólidos. Su volumen depende de la distribución de tamaños de dichos materiales y del grado de compresión (Margalef 1983). Según Cole (1983) el origen del material fecal de los sedimentos de este tipo yace principalmente en el bentos, sobre todo en los Chironomidae. Sin embargo, casi nunca se han encontrado miembros de esta familia en el bentos de la estación de muestreo. Posiblemente las heces que enriquecen el sedimento provienen de peces (tilapias y poecilides principalmente) y del macrozooplancton presente conformado por *Brachionus plicatilis*, *Arctodiaptomus dorsalis*, *Thermocyclops decipiens* y *Moina macrocarpa*.

En los lagos eutróficos y oligotróficos en los que predomina la producción primaria fitoplanctónica de algas no lignificadas, la entrada de humus a los sedimentos es relativamente escasa (a no ser que se trate de aguas negras ácidas o turberas) en comparación con el influjo de las fuentes alóctonas y litorales. Cabe pensar pues que los sedimentos de estos lagos son del tipo *gytjjia* (Wetzel 1981) y su composición es debida al predominio de la materia orgánica de tipo autóctono. Esta suposición cobra mayor fuerza si se considera que la laguna del Parque Norte es un sistema endorreico, en el cual los aportes alóctonos de material orgánico son notablemente reducidos. Generalmente este sedimento autóctono está compuesto principalmente por frústulas de diatomeas, espículas de esponjas y carbonato de calcio precipitado mediante eventos biológicos (Cole 1983). En la laguna del Parque Norte el mayor contribuyente al sedimento debe ser el último, puesto que la concentración de calcio hallada fue de 14.9 mEq/100 g de sedimento. Además, esta laguna siempre se ha caracterizado por la casi total ausencia de diatomeas y desmidias y por los altos valores de dureza por calcio y magnesio (Ramírez 1987, 1994).

Aunque como ya se mencionó el porcentaje medio de materia orgánica obtenido en el sedimento de la laguna del Parque Norte fue alto en comparación con los mostrados en la Tabla 1 y se concluyó que son sedimentos orgánicos, esta concentración de materia orgánica es baja si se compara con los registros de Stangenberg (1949), Ballinger & McKnee (1971) para lagos templados, quienes consideran comunes contenidos de materia orgánica del 45% y más. Estos valores, comparativamente bajos, se deben principalmente a las altas tasas de actividad microbiana ocasionadas por las altas temperaturas presentes en la columna de agua, las cuales acentúan el denominado 'metabolismo en corto circuito' (Ruttner 1953) consistente en la rápida mineralización del material orgánico aún dentro de la columna de agua. Según Ruttner (1953), en las regiones tropicales la mineralización de la materia orgánica se ajusta a la regla de Van T'Hoff, descomponiéndose 4 a 9 veces más rápido que en regiones templadas. Por ello, las altas temperaturas registradas en estos sistemas pueden considerarse el motor del rápido catabolismo tropical y del metabolismo en corto circuito. Las temperaturas registradas en el fondo de la columna de agua de la laguna del Parque Norte durante el año 2000 oscilaron entre 21.3º C y 25º C (n = 12). Estas altas temperaturas explican también las bajas concentraciones de fósforo en el sedimento cuando comparadas con las halladas en otros cuerpos de agua (Tabla 1).

Solamente en ecosistemas lacustres tropicales, con producción primaria muy

elevada (altas densidades fitoplanctónicas y/o macrófitas acuáticas) o con alta contribución de material orgánico alóctono, se puede formar sedimento típicamente orgánico, con altas concentraciones de materia orgánica (entre 45 y 70%), correspondiente a aquellos encontrados en lagos eutróficos de zonas templadas. Por ello, la concentración de materia orgánica en el sedimento de lagos tropicales no refleja, como en lagos templados, la magnitud de la producción del sistema.

Para resaltar el poder de descomposición potenciado por las altas temperaturas baste decir que el porcentaje medio de materia orgánica (estimado a partir de los sólidos suspendidos volátiles) en el seston es del 73.5% (n = 12). Lo anterior sugiere que a pesar de que la columna de agua es de tan sólo dos metros, debido al poder catabólico de las bacterias presentes influenciado a su vez por las altas temperaturas, el metabolismo de corto circuito es de fundamental importancia y es el responsable de las diferencias de material orgánico entre el sedimento y el agua. Para reforzar lo anterior, baste decir que el porcentaje de materia orgánica en el agua es 5.07 veces mayor que el del sedimento. Esto demuestra que más que el contenido de materia orgánica en los sedimentos, es la alta tasa de recambio del material orgánico entre este compartimiento y el agua circundante lo que mantiene la producción del sistema. Según Carmouze (1994) el tamaño de este compartimiento cambia continuamente controlado por el balance de los flujos de entrada y salida de los propios elementos constitutivos en sus fronteras. Conforme los flujos de entrada superan o no a los flujos de salida, el tamaño (o el contenido) del compartimiento aumenta o disminuye. El propio ecosistema, definido por el conjunto de compartimientos, se caracteriza por un régimen de circulación permanente de materia y energía, o por un estado estacionario cuando todos los compartimientos se encuentran simultáneamente en equilibrio dinámico. Esta es una situación teórica, pues el ecosistema difícilmente se mantiene en este estado por mucho tiempo; por el contrario, evoluciona continuamente debido a un permanente desequilibrio entre los flujos de entrada y salida al nivel de cada compartimiento.

Dinámica del fondo

Los lagos del tipo II, es decir aquellos con curva hipsográfica cóncava, presentan generalmente una menor influencia de la mezcla originada en el estrés eólico sobre el área del fondo. Esta menor influencia se debe a que en estos cuerpos de agua se presentan áreas menores encima de la base de las olas; estas son las áreas expuestas a erosión y transporte (Fig. 1A). Aunque en los lagos sometidos a esta condición la deposición de material fino (cuya concentración dependerá del origen del lago) es más continua, en el caso de la laguna del Parque Norte la resuspensión ocasionada por la mezcla es comparativamente baja, máxime cuando el sedimento tiene como componente principal la arena. El valor del coeficiente de resuspensión hallado (que indica que el sedimento resuspendible presente en el a_{E+T} podrá ser recirculado apenas 0.2 veces en un año), el alto valor de la profundidad crítica (D_{T-A} = 80.9%) y el que las áreas por debajo de esa profundidad correspondan a áreas de acumulación, constatan esta condición en el cuerpo de agua bajo estudio. Reiteran además un aspecto importante, ya mencionado varias veces para este cuerpo de agua: que el vaso de la laguna por sus características morfométricas funciona como una trampa de sedimento.

La forma del cuerpo de agua, evidenciada en la curva hipsográfica de la Figura 1A, conjuntamente con su origen (la planicie aluvial del río Medellín), son en última

instancia las responsables de la lenta dinámica del fondo en este ecosistema. No sobra decir que la probabilidad de ocurrencia de un lago con la forma que presenta la laguna del Parque Norte [f(3), Fig. 1B], es sólo del 6.5% (Håkanson 1981); por ello, su alta desviación estándar de la forma convencional media.
Pese a su condición de trampa de sedimentos, por la lenta circulación de los mismos, en la laguna del Parque Norte y en los lagos rasos en general existe una mayor disponibilidad de nutrientes debida a la 'recuperación' de los mismos desde aguas más profundas por la profundidad de la zona de mezcla, la cual se incrementa especialmente durante la noche por el enfriamiento conveccional de la superficie del agua (Ramírez & Díaz 1995).

Aunque esta acción no resuspenda el sedimento en la laguna estudiada, como lo muestra el ya mencionado valor de la profundidad crítica, si lleva los gases que se liberan desde él al resto de la columna de agua. Por ello, es necesario recalcar que lenta resuspensión del sedimento, no significa ausencia de circulación de los nutrientes liberados desde él por el efecto combinado de eventos microbiológicos y difusivos. Prueba de dicho evento es, como ya se mencionó anteriormente, la baja concentración de material orgánico presente en el sedimento. Wetzel (2001) recalca que en los lagos rasos las pérdidas de nutrientes a depositarios potenciales, tales como el sedimento o las salidas, son menores y que las tasas de reciclaje de nutrientes son mayores en cuerpos de agua de este tipo, lo que incrementa su posibilidad de eutroficación, pues a las cargas externas de nutrientes se suman las internas. Por ello, el suplemento de nutrientes, asegurado por la circulación de los mismos desde el sedimento, no siempre influenciará la producción fitoplanctónica debido a que difícilmente serán limitantes. La limitación provendrá entonces de otros factores como la disponibilidad lumínica, por ejemplo.

CONCLUSIONES

La primera hipótesis fue refutada en parte, pues aunque la laguna del Parque Norte presenta un sedimento de tipo franco-arenoso, su contenido de material orgánico es bajo, lo cual corrobora lo previsto en la segunda hipótesis. Puede decirse entonces que a pesar de la poca profundidad de la columna de agua, el metabolismo de corto circuito es el responsable de los bajos porcentajes de material orgánico presentes en el sedimento, cuando son comparados con los de lagos de otras latitudes. El sedimento de la laguna del Parque Norte es poco dinámico, siendo baja su resuspensión, lo que corresponde a un sistema que funciona como una trampa de sedimentos, mas no de nutrientes retenidos en él.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Comité de Investigaciones (CODI) de la Universidad de Antioquia (IN 86 CE, acta 295 de 1998) por el apoyo económico, y a las autoridades del Parque Norte por su apoyo logístico.

LITERATURA CITADA

ALONSO, M. 1998. Las lagunas de la España peninsular. Limnetica 15: 1-176.

BALLINGER, D. G. & G. D. MCKNEE. 1971. Chemical characterization of bottom sediments. Journal of Water Pollution 43: 216-227.

BARBANTI, L. 1985. Some problems and new prospects on Physical Limnology. Limnology: a review. Memorias Istituto Italiano de Idrobiologia 43: 1-32.

CALLISTO, M. & F. A. ESTEVES. 1996. Composição granulométrica do sedimento de um lago amazônico impactado por rejeito de bauxita e um lago natural. Acta Limnologica Brasiliensia 8: 115-126.

CAMPOS, N. H. 1992. Descarga de materiales pesados en la ciénaga Grande de Santa

Marta, Caribe colombiano, con el material suspendido. Contaminación Ambiental 23: 11-23.

CARMOUZE, J. P. 1994. *O metabolismo dos ecossistemas aquáticos. Fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas*. Editora Edgar Blücher Ltda-Fapesp. São Paulo-SP.

COLE, G. A. 1983. *Textbook of Limnology.* 3rd ed. The CV Mosby Co. Saint Louis.

ESPINAL, S. L. 1992. *Geografía ecológica de Antioquia. Zonas de Vida.* Edit. Lealon. Medellín.

ESTEVES, F. 1983. Levels of phosphate, calcium, magnesium and organic matter in the sediments of some brazilian reservoirs and implications for the metabolism of the ecoystems. Archiv für Hydrobiologie 96: 129-138.

ESTEVES, F. A. 1988. Considerações sobre a aplicação da tipologia de lagos temperados a lagos tropicais. Acta Limnologica Brasiliensia 2: 3-28.

ESTEVES, F. A. & A. F. M. CAMARGO. 1982. Caracterização de sedimentos de 17 reservatórios do Estado de São Paulo com base no teor de feopigmentos, carbono orgânico e nitrogênio orgânico. Ciência e Cultura 34: 669-674.

ESTEVES, F., R. BARBIERI, I. HIROMO & A. F. M. CAMARGO. 1983. Caracterização limnológica preliminar de um lago de dolina: lago Poço Verde, Coromandel, MG. Annais do Seminario Regional de Ecologia 3: 39-65.

ESTEVES, F. & M. TOLENTINO. 1986. Identificação e caracterização de alguns grupos de represas do Estado de São Paulo, com base na composição química dos seus sedimentos. Ciência e Cultura 38: 540-546.

FOREL, F. A. 1892. *Le Leman: monographie Limnologique. Tome 1. Geographie, Hydrographie, Geologie, Climatologie, Hidrologie*. F. Rouge, Lausanne.

HÅKANSON, L. 1981. *A manual of lake morphometry.* Springer-Verlag. Heidelbeg.

HÅKANSON, L. & M. JANSSON. 2002. *Principles of lake sedimentology*. The Blackburn Press. Nueva Jersey.

HOLDRIDGE, L. R. 1978. *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica.

HUMMEL, K. 1931. Sedimente indonesischer Süsswasserseen. Archiv für Hydrobiologie 71: 363-380. Págs. 129-138 en: Esteves, F. A. 1983. Levels of phosphate, calcium, magnesium and organic matter in the sediments of some brazilian reservoirs and implications for the metabolism of the ecoystems. Archive für Hydrobiologie 96.

MARGALEF, R. 1983. *Limnología*. Ed. Omega S. A. Barcelona.

NAUMANN, E. 1930. Einführung in die Bodenkunde der Seen. Die Binnengewässer IX. E. Schweizerbart, Stuttgart. Págs. 129-138 en: Esteves, F. 1983. Levels of phosphate, calcium, magnesium and organic matter in the sediments of some brazilian reservoirs and implications for the metabolism of the ecoystems. Archiv für Hydrobiologie 96.

NIXDORF, B. & R. DENEKE. 1997. Why 'very shallow' lakes are more successful opposing reduced nutrient loads. Hydrobiologia 342/343: 269-284.

NOREÑA J. F. & J. J. RAMÍREZ. 2001. Comportamiento de la tasa de sedimentación del material sestónico en dos periodos climáticos contrastantes en un lago urbano raso: laguna del Parque Norte, Medellín (Colombia). Actualidades Biológicas 74: 65-74.

PETRUCIO, M. M., A. ENRICH-PRAST & F. A. ESTEVES. 1997. Vertical distribution of nutrients in the sediments of a brazilian coastal lagoon (Imboacica lagoon, Rio de Janeiro). Acta Limnologica Brasiliensia 9: 117-124.

RAMÍREZ, J. J. 1987. Contribución al conocimiento de las condiciones limnológicas de la laguna del Parque Norte. Actualidades Biológicas 16: 12-30.

RAMÍREZ, J. J. 2000. Variación diurna y estacional del contenido calórico, la estabilidad y el trabajo del viento en una laguna Tropical. Acta Limnologica Brasiliensia 12: 39-54.

RAMÍREZ, J. J. & C. A. DÍAZ. 1995. Cambios diurnos de temperatura y variables físicas y químicas en dos épocas del año en la Laguna del Parque Norte, Colombia. Acta Limnologica Brasiliensia 7: 87-104.

RAMÍREZ, J. J & H. ALCARÁZ. 2002. Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un sistema eutrófico tropical: laguna del Parque Norte, Medellín, Colombia. Caldasia 24: 411-423.

RUTTNER, F. 1953. *Fundamentals of Limnology.* University of Toronto Press, Toronto.

SCHÄFER, A. 1985. *Fundamentos de ecologia e biogeografia das águas continentais*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

SCHÄFER, A. 1992. Ecological characteristics of the coastal lakes in southern Brazil: a sybthesis. Acta Limnol. Brasil. 4: 111-122.

SCHWARZBOLD, A. & A. SCHÄFER. 1984. Gênese e morfologia das lagoas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. Amazoniana 9: 87-104.

STANGENBERG, M. 1949. Nitrogen and carbon in the bottom-deposits of lakes and in the soil under carp ponds. Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie 10: 422-437.

TIMMS, B. C. 1992. *Lakes Geomorphology*. Gleneagles Publishing. Australia.

UNGEMACH, H. 1960. Sedimentchemismus und seine Beziehungen zum Stoffhaushalt in 40 Europäischen Seen. Universität Kiel, Kiel. Pags. 129-138 en: Esteves, F. 1983. Levels of phosphate, calcium, magnesium and organic matter in the sediments of some brazilian reservoirs and implications for the metabolism of the ecoystems. Archiv für Hydrobiologie 96.

VINER, A. B. 1975a. The sediments of lake George, Uganda. I. Redox potentials, oxygen comsumption and carbon dioxide output. Archiv für Hydrobiologie 76: 181-197.

VINER, A. B. 1975b. The sediments of lake George, Uganda. II. Release of ammonia and phosphorus from an undisturbed mud surface. Archiv für Hydrobiologie 76: 368-378.

VINER, A. B. 1975c. The sediments of lake George, Uganda. III. The uptake of phosphate. Archiv für Hydrobiologie 76: 393-410.

VINER, A. B. 1975d. Non-biological factors affecting phosphate recycling in the water of a tropical eutrophic lake. Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie 19: 1404-1415.

WELCH, P. S. 1948. *Limnological Methods.* McGraw Hill Book Co., Inc. New York..

WETZEL, R. 1981. Limnología. Ediciones Omega S.A. Barcelona.

WETZEL, R. 2001. *Limnology. Lakes and river ecosystems*. 3rd ed. Academic Press. San Diego.

Recibido: 27/10/2003
Aceptado: 30/04/2004